

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 200324004

UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

两种不可逆磁制冷循环优化性能的研究

Investigation on the optimal performance of the two kinds of
irreversible magnetic refrigeration cycles

夏 峥 嵘

指导教师姓名: 林 国 星 教授

专 业 名 称: 理 论 物 理

论文提交日期: 2006 年 5 月

论文答辩时间: 2006 年 月

学位授予日期: 2006 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密 (), 在 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ()

作者签名: 日期: 年 月 日

导师签名: 日期: 年 月 日

摘要

制冷技术在许多领域都有广泛应用。传统的制冷系统存在易破坏大气臭氧层、设备复杂和效率低等缺点。近年来,随着人们环保意识的增强,磁制冷因为其环保、高效、节能和性能稳定等优点而得到迅速发展。磁制冷是一种高新的绿色制冷技术,目前大部分工作主要集中在磁性材料的研究上,对磁制冷循环理论的研究相对较少。开展磁制冷循环理论的研究,能揭示多种不可逆因素对磁制冷机循环性能的影响,有利于提高磁制冷机的性能,正成为一个重要而又前景喜人的研究课题。

第一章首先简要介绍了有限时间热力学理论及其研究进展,进而叙述磁热效应、磁致冷原理和磁致冷技术及其研究进展,最后概述了本学位论文的主要研究内容。

第二章建立以一般顺磁盐为工质的不可逆埃里克森制冷循环新模型,应用有限时间热力学理论和最优控制论方法,揭示传热不可逆性、热漏、回热时间、非理想回热、回热器效率及工质内部不可逆性等对制冷循环性能的影响,数值算例详细分析这些不可逆性对制冷率和制冷系数等的影响,获得制冷率和制冷系数以及输入功率等重要性能界限以及这些重要性能参量的优化工作区间,所得结论比现有一些文献更为普遍。

第三章建立不可逆磁布雷顿制冷循环新模型,基于顺磁材料的热力学基本方程和循环模型,应用对数平均温差(LMTD)和最优控制论方法,导出制冷率和制冷系数的数学表式,以制冷率为目标函数对循环的重要性能参量进行优化,通过数值方法获得制冷率、制冷系数及其关系曲线,确定了包括最小磁场比、制冷率、制冷系数、工质工作温度等优化区域,揭示热阻和绝热过程不可逆性对循环性能的影响。所得结论对改善磁布雷顿制冷循环性能有重要的指导意义。

关键词: 顺磁材料; 不可逆性; 制冷循环; 优化

ABSTRACT

The technology of refrigeration has been applied popularly in many fields. Conventional refrigeration systems have many disadvantages such as serious concerns for the ozonosphere, complex apparatus and lower efficiency. Recently, more and more attentions have been paid to the environmental protection together with that magnetic refrigeration has had great development because its merits in refrigeration efficiency, reliability, saving energy and environmental friendliness. Magnetic refrigeration is an advanced and novel green refrigeration technology. So far most of research works involving magnetic refrigeration have been focused on exploring new magnetic refrigeration materials and designing novel magnetic refrigerators. However, study on the theory of magnetic refrigeration cycle has not been paid more attention to. Theoretical investigation on magnetic refrigeration cycle, which can reveal the influence of many irreversibilities on performance of magnetic refrigeration cycle, is beneficial to performance improvement of magnetic refrigerators and is becoming a significant and promising subject.

At the beginning in Chapter 1, the theory of finite time thermodynamics and its development are introduced briefly. And, magnetocaloric effect, principle of magnetic refrigeration, technology of magnetic refrigeration and its development are presented in this Chapter. Afterward, the outline of this thesis is given.

In Chapter 2, a new model of irreversible Ericsson refrigeration cycle employing paramagnetic materials as the working substance is established. By using finite time thermodynamic theory and the optimal control theory method, the influences of multi-irreversibilities, such as thermal resistance, heat leak, efficiency of regenerator and internal irreversibility resulting from magnetic working substances, on the performance of the refrigeration cycle are investigated. At the same time, by means of numerical value calculation, the effects of the irreversibilities on the cooling rate, coefficient of performance of the refrigeration cycle are analyzed in detail. The important performance bounds such as the cooling rate, coefficient of performance,

power input and their optimal operating regions are determined. The results obtained here is more general than those presented in the existing literatures.

In Chapter 3, a new irreversible magnetic Brayton refrigeration cycle model is set up. Based on the cyclic model and the fundamental thermodynamic equations of paramagnetic materials, the mathematical expressions of the cooling rate and coefficient of performance are derived by employing the log mean temperature difference (LMTD) and the optimal control theory method. Some important performance parameters are optimized on the objective function-- the cooling rate. By means of numerical value calculation, the cooling rate, coefficient of performance and the relationship curves between the two are obtained. Furthermore, some optimal operating regions including the cooling rate, coefficient of performance, the minimum ratio of the magnetic fields and the temperatures of the cyclic working substance are determined and evaluated. The influences of the thermal resistance and the irreversibility during the adiabatic processes on the performance of irreversible Brayton refrigeration cycle are revealed. The results obtained can provide some important reference information for the optimal design and performance improvement of magnetic refrigerators.

Key words: paramagnetic material; irreversibility; refrigeration cycle; optimization

目 录

第一章 引 言

§ 1.1.有限时间热力学简介	1
§ 1.2.磁制冷的发展及其研究现状	3
§ 1.3.本论文的研究内容及安排	8
参考文献	9

第二章 不可逆磁埃里克森制冷循环的优化性能

§ 2.1. 顺磁材料的热力学性质	17
§ 2.2. 循环模型及其数学描述	18
§ 2.3. 三个重要的性能参数及其优化分析	21
§ 2.4. 讨论	25
§ 2.4.1 优化工作区域	25
§ 2.4.2. 热漏对循环性能的影响	29
§ 2.4.3. 内不可逆性和回热器效率对循环性能的影响	30
§ 2.4.4. 磁场强度比对循环性能的影响	30
§ 2.4.5. 特例.....	32
§ 2.5. 小结	33
参考文献	33

第三章 热阻及绝热不可逆性对磁布雷顿制冷循环性能的影响

§ 3.1. 基本热力学方程	36
§ 3.2. 不可逆磁布雷顿制冷循环	37
§ 3.3. 制冷率和制冷系数	39
§ 3.4. 优化性能分析	41
§ 3.5. 讨论	45
§ 3.5.1. 几个重要性能参数及其界限	45
§ 3.5.2. 制冷系数 ε 和温度比 T_4/T_2 的关系	46
§ 3.5.3. 绝热不可逆性对循环性能的影响	47
§ 3.5.4. 特例	48

§ 3.6 小结	49
参考文献	49

第四章 结束语

附录

致谢

厦门大学博硕士论文摘要库

CONTENTS

Chapter 1 Introduction

§ 1.1. A brief introduction to finite time thermodynamics	1
§ 1.2. Development of magnetic refrigeration and its current status	3
§ 1.3. Outline of the thesis	8
References	9

Chapter 2 Optimal performance of an irreversible magnetic Ericsson refrigeration cycle

§ 2.1. Thermodynamic properties of paramagnetic material	17
§ 2.2. A cycle model and its mathematical description	18
§ 2.3. Three important performance parameters and their optimal analysis.	21
§ 2.4. Discussion	25
§ 2.4.1. Optimal operating regions	25
§ 2.4.2. The influence of the heat leak on the cycle performance	29
§ 2.4.3. The effect of endo-irreversibility and efficiency of the regenerator on the cycle performance	30
§ 2.4.4. The influence of the magnetic fields ratio on the cycle performance ...	30
§ 2.4.5. Special cases	32
§ 2.5. Conclusions	33
References	33

Chapter 3 The effect of thermal resistance and irreversibility in the adiabatic processes on the performance of a magnetic Brayton refrigeration cycle

§ 3.1. Fundamental thermodynamic equations	36
§ 3.2. An irreversible magnetic Brayton refrigeration cycle	37
§ 3.3. Cooling rate and coefficient of performance	39
§ 3.4. Optimal analysis of the performance characteristics	41

§ 3.5. Discussion	45
§ 3.5.1. Several important performance parameters and their bounds	45
§ 3.5.2. The relation between the coefficient of performance ε and the temperature ratio T_4/T_2	46
§ 3.5.3. The influence of irreversibility during the adiabatic processes on the cycle performance	47
§ 3.5.4. Special cases	48
§ 3.6. Conclusions	49
References	49

Chapter 4 Summary

Appendix

Acknowledgements

第一章 引言

§ 1.1. 有限时间热力学简介

经典热力学理论因为其普适性在科学技术进步和生产发展中起了重要作用。众所周知，卡诺效率 $\eta_c = 1 - T_L/T_H$ 给出了工作在温度为 T_H 的高温热源和温度为 T_L 的低温热源间一切热机的最大效率，它确定了二源热机效率的上限。然而，经典热力学也存在其自身的局限性。因为在经典热力学研究中，相关过程必须为连续变化的平衡态或准静态过程，过程进行需要无限长时间。而实际发生的热力学过程总是在有限时间内完成的，并且受多种不可逆因素的影响。此外，任何一台实用热机，需要考虑的性能指标不仅包括其性能系数，还必须包括输出功率等与时间相关的热力学量。为了使理论更好地指导实际热工设备，近 30 年来人们建立和逐步完善了一种新的理论—有限时间热力学。

有限时间热力学主要研究非平衡系统在有限时间内能流和熵流的规律，是平衡态热力学的延伸和推广。它基于热力学第一定律和热力学第二定律，结合热力学与传热学、流体力学和其他传输过程基本规律等，应用变分原理和最优控制理论，探索在有限时间或设备的有限尺寸等约束条件下热力学过程变化的最佳运行路径 [1-4]。研究表明，有限时间热力学理论比经典热力学更接近于实际热工设备的性能特性。有限时间热力学不像工程热力学那样详细地描述实际设备的细节信息，是介于工程热力学与物理基础理论之间的一门新兴学科。它侧重于了解整个系统在有限时间中的整体行为，分析热力过程中不可逆性的本质规律，探索不可逆因素对热力过程相关运行参量的根本影响，从而有利于人们掌握改善热工设备性能的方法和途径，最终使新理论更好地指导实践。基于这些指导思想，有限时间热力学的主要任务是从复杂的实际热力系统中，构造能较好体现热力系统或过程运行的一般模型，并对模型加以数学表述，从而使热力系统或过程中热力学量的特点及变化规律得以定性和定量地逻辑描述。在有限时间热力学相关模型的建立中，不可逆因素的数学化是一项重要的工作。应该指出的是，和其它领域的研究类似，有限时间热力学总是尽可能突出一些主要的不可逆因素，而暂时略去一些次要因素，以便我们能有效地分析主要不可逆因素对过程或系统运行的

本质影响。否则,把所有的影响因素包含在模型中往往使问题变得非常复杂,最终无法解决任何问题。

众所周知,卡诺热机是理想热机模型,没有涉及任何不可逆效应。而实际热机总是存在热阻、热漏、摩擦、惯性效应、流体流阻和工质内部由于涡流等引起的耗散等不可逆因素。Chambadal、Novikov和Curzon等[5-7]相继考虑了热机循环工质和外部热源间的传热不可逆性,建立了内可逆卡诺热机循环模型,导出了热机在最大功率输出时的效率等于 $1-\sqrt{T_L/T_H}$,亦即CNCA效率,常称之为CA效率 η_{CA} 。CA效率是有限时间热力学理论的重要标志之一,也为有限时间热力学的发展奠定了基础。随后,国内外许多学者对内可逆的循环模型进行了多方面的研究。如Rubin等[8-12]先后以最小熵产生率、最大热经济利润率、最大输出功率以及最大效率等为目标函数,研究了受传热不可逆性影响的热机的优化性能。Gordon等[13-22]将有限速率热传导应用于太阳能热机系统、热泵系统和制冷系统等方面的理论研究中,获得了比经典热力学更接近于实际的性能界限。随着有限时间热力学在热力循环理论中研究的深入,De Vos等[23-24]将其研究方法拓展到化学反应系统的研究中,建立了内可逆化学机模型,进一步丰富了有限时间热力学的研究内容。Brown和De Vos等[25-30]又将其应用于火用优化理论、热经济优化理论以及生态学优化理论的分析中,开拓了一些交叉学科的研究。然而,除了传热不可逆性外,实际热力过程或系统还存在其它不可逆因素。显然,进一步考虑热漏、摩擦、外部热源的有限热容、回热循环的回热损失、质量传递不可逆性、质量漏等其它多种不可逆因素对热力过程或循环影响是很有必要的。一些学者在热机和制冷机[31-37]、热泵[38-39]、化学机和化学泵[40-42]、量子热机和制冷机[43-45]、太阳能热力循环系统[46-47]开展了这方面的研究,且将火用分析理论[48-49]、热经济分析理论[50-51]、生态学优化理论[52]等应用到这些循环系统中,得到了一系列比经典热力学更为实际和有用的重要结论,为实际热力系统的优化设计提供了更为精确的理论指导。随着研究的深入,热力循环系统中工质的内部耗散等内不可逆性被人们所重视,一些学者引入了内不可逆参量来描述循环工质的内部不可逆性程度,建立了内不可逆热力循环模型[53-58],揭示了工质的内不可逆性对热力循环性能的影响,所得结论有利于人们更好地理解多种不可逆因素对系统循环性能的影响。

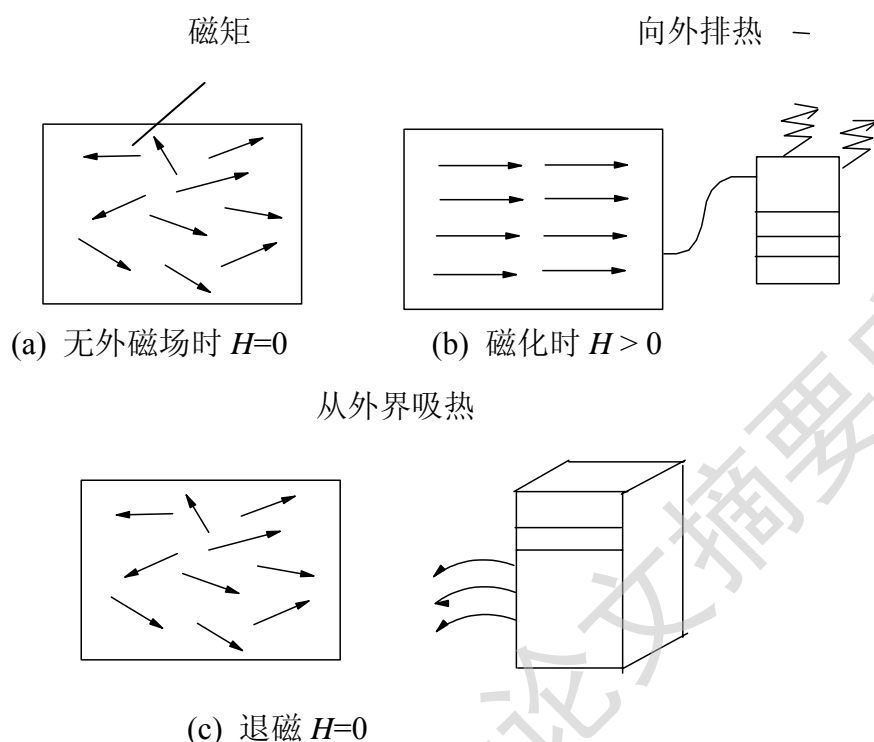


图 1.1. 磁热效应原理示意图

迄今为止，有限时间热力学研究范围已涉及国防、能源技术、工农业生产、医疗、化工和生命科学等领域，它是一门具有重要学术理论价值和应用前景的学科。

§ 1.2 磁制冷的发展及其研究现状

磁制冷是利用磁性材料的磁热效应（Magnetocaloric Effect, MCE）实现制冷目的的。磁热效应是磁性材料的一种固有特性，外磁场的变化引起磁性材料自身磁熵改变，同时伴随着材料与其环境的吸放热过程。亦即当一些磁性材料被加入外磁场（磁化）时，磁性材料的磁矩有序性增加，磁熵降低且放出热量；反之，当外磁场被消除（退磁）时，磁性材料的磁矩无序性增加，磁熵升高并吸收致冷空间的热量，进而实现制冷之目的，其原理如图 1.1 所示[59]。

随着科学技术的发展和社会的进步,磁制冷技术在国民经济的许多领域都得到应用。如低温工程、石油化工、高能物理、精密仪器、超导电技术、航空航天、医疗器械等等。它作为一种高新制冷技术,近年来倍受国内外学术和工程界的青睐。传统的制冷技术大多是基于气体的压缩/膨胀技术而实现制冷,它需要导致臭氧层破坏的工作物质和较大动力的气体压缩机等。而磁制冷技术是基于磁性材料的磁热效应、通过磁化和退磁过程的反复循环达到制冷目的的,它无需将破坏臭氧层和引起温室效应的工作物质,被称为是一种绿色环保的制冷技术。

与传统气体压缩与膨胀制冷技术相比,磁制冷所采用的制冷工质为磁性物质,对臭氧层无破坏作用,无温室效应,而且磁性物质的磁熵密度比气体大,因此磁制冷装置可以做得更紧凑;磁制冷只要用电磁体或超导体甚至永久磁体提供所需的磁场,无需压缩机,没有运动部件的连接和磨损等问题,因此机械振动及噪声小,可靠性强,寿命长;在热效率方面,磁制冷可以达到卡诺循环的 30%—60%,而依靠气体压缩—膨胀的制冷循环一般只能达到卡诺循环的 5%—10% [59]。磁制冷循环原理示意图如图 1.2 [60] 所示。在图 1.2 中, B—C 过程为磁工质绝热励磁过程,该过程磁工质磁矩有序性增大,磁熵减小,磁工质温度升高,且高于高温热源(或环境)温度; C—D 过程为磁工质向高温热源(或环境)放出热量的过程,磁工质温度降低; D—A 过程为绝热去磁过程,经过该过程,磁工质磁矩有序性减小,磁熵增大,磁工质温度进一步降低;当 A 状态下磁工质的温度比低温热源(或制冷空间)的温度低时,一旦磁工质与低温热源(或制冷空间)热接触,它将吸收热量,温度升高,并回到原出发点 B,完成整个循环,从中实现制冷目的。

磁制冷是一种应用前景广阔的制冷技术,已有100多年的历史。1881年, E. Warburg [61] 首先发现了金属铁在外磁场中的热效应,随后Debye和Giauque [62-63] 两位科学家分别从理论上推导出可以利用绝热去磁方法实现制冷,这极大地促进了磁制冷理论和技术的发展。1933年, Giauque 和 Mc Dougall[64] 用 $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 作为工质首次完成了绝热去磁实验,并获得了0.53—0.1K 超低温。此后,在低温领域中磁制冷技术得到了广泛应用。目前超低温磁制冷技术已经比较成熟。美国、日本、法国均研制了多种低温磁制冷冰箱,为低温和超低温科学技术研究创造了条件。磁制冷还应用于卫星、宇宙飞船等航天器的参数检

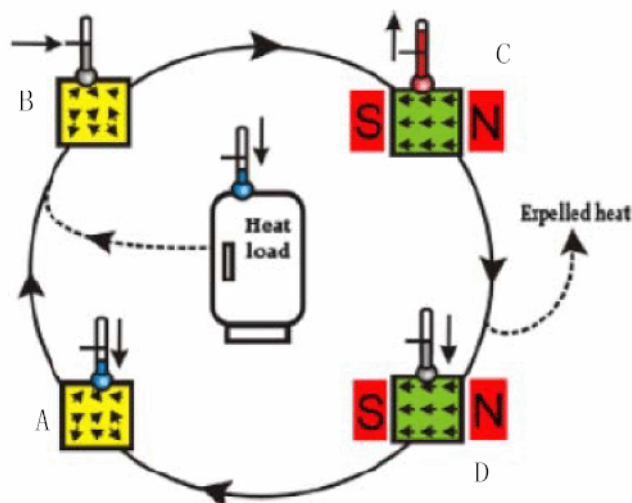


图 1.2 磁制冷循环原理示意图

测和数据处理系统中[60]。上世纪70年代以来，随着磁制冷材料理论与实验技术的迅速发展，磁制冷技术的研制也逐渐从低温向高温发展。1976年，美国宇航公司（NASA）的Brown[65]首先采用金属Gd 作为制冷工质，采用类似Ericsson循环的往复式磁制冷循环装置，首次实现了室温磁制冷，获得了47K的温差。但由于所用的Gd 板在上下运动过程中会引起蓄冷流体的搅混，直接破坏蓄冷效果，为此只好放慢循环速度，导致大大地降低了实用的可能性。尽管这样，这个实验在室温磁制冷历史上仍然具有里程碑的意义。随后的1978年，美国Los Alamos实验室的 Steyert 等[66] 设计了一台回旋式磁制冷装置，该装置采用Brayton 循环，2.3 kg 金属Gd制成直径为150mm的多孔转盘，采用强制水流反向流经旋转的园盘进行热交换，当高低磁场差为1.2T，温跨7K时，能达到500W的制冷功率，但该装置的最大温跨仅为9K。经过近20年的努力，1996年，美国依阿华大学Ames实验室与美国宇航公司合作，成功开发了往复式磁制冷样机[67]。该制冷机采用3kg 纯度大于99.8% Gd 球作为循环工质，热交换流体为水和酒精，外加磁场为0~5T 的超导磁场，制冷功率在磁场强度变化为5T时可达500~600W，最大温跨18K，制冷效率可达卡诺循环的30%，该机安全运行了1500多小时，未发生故障，获得了大量有价值的实验数据。这使得室温磁制冷技术取得了突破性进展。遗憾的是，该样机的工作磁场必须由超导磁体提供，致使应用范围受到很大的限制。此外，高纯度的金属Gd难以获得且昂贵。因此，要提高磁制冷机的循环性

能和它的实用化, 探寻新的室温磁制冷材料已是当务之急。

1997年, 美国Ames实验室的 Pecharsky 等[68]发掘了 $\text{Gd}_5\text{Si}_x(\text{Ge}_{1-x})_4$ 系列合金的巨磁热效应(GMCE); 2001年, 荷兰阿姆斯特丹大学Tegus等[69]发现了居里温度高(可达300 K左右)并可调、成本低、有巨磁热效应的化合物 $\text{MnFeP}_{1-x}\text{As}_x$ 系列室温磁制冷材料。另一方面, 美国的Ames实验室采用常温永磁铁励磁的家用空调磁制冷样机问世[70]。这些都极大地促进了室温磁制冷技术的发展。

近年来, 国内外一些学者致力于磁制冷材料的实验研究[71-77], 不断探寻适合在不同工作温区的磁制冷材料, 同时磁制冷装置的设计也趋于多样化[78-83]。另一方面, 磁制冷技术的发展对磁制冷循环理论的研究也提出了新的课题。目前, 常用的磁制冷循环方式主要有卡诺(Carnot)循环, 斯特林(Stirling)循环, 埃里克森(Ericsson)循环和布雷顿(Brayton)循环。在20K以下的温区, 磁工质的晶格熵很小以致可以被忽略, 因而应用卡诺制冷循环和埃里克森制冷循环都可以达到较好的制冷效果。随着温度的升高, 磁工质的晶格熵逐渐增大。当温度高于20K时, 晶格熵和磁熵可相比, 此时制冷装置中需加入蓄热器来提高制冷性能, 卡诺制冷循环将不再适用, 一般都采用斯特林循环, 埃里克森循环或布雷顿循环。表1.1 [84]给出了几种循环优缺点和适用范围的比较。近年来, 一些学者对磁制冷循环理论开展了研究[85-103], 探讨了相关制冷循环的优化性能, 获得了一些有意义的结论, 为磁制冷机的优化设计提供了理论信息。1987年, 南京大学的金新和欧阳容百等研究了以满足居里定律的顺磁盐为工质的斯特林制冷循环, 指出制冷循环的制冷系数可达到相同条件下卡诺循环的制冷系数[79]。随后, 陈金灿等[86]研究了以铁磁材料为工质的斯特林制冷循环的性能, 分析了两个等磁化过程中磁场的控制问题。考虑到传热过程的不可逆性, 林国星等[87]建立了以铁磁材料为工质的斯特林制冷循环模型, 导出了循环制冷率和制冷系数间的优化关系, 得到了最大制冷率等性能界限。当然, 对于实际设备, 除了传热不可逆性外, 还存在着热漏、回热损失以及工质内部耗散等不可逆因素, 且受传热规律等的影响。陈等[88,89] 分别在不同的传热规律下, 建立了受热阻和回热损失影响的铁磁斯特林制冷循环的模型, Wu等 [90]建立了以满足居里定律的顺磁盐为工质且受热阻、热漏、回热损失以及工质内部耗散等不可逆性影响的斯特林制冷循环模型, 而Lin等[91]建立了受热阻、热漏及回热时间等影响的铁磁斯特林制冷循环模型。他们

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库